

# Аспекты развития 5G-сетей

М. Макушин<sup>1</sup>, А. Фомина, д. э. н.<sup>2</sup>

УДК 621.396 | ВАК 05.13.01

Сети 5G, о которых так много говорили, начинают развертываться, а телефоны для них уже продаются – причем в ряде стран еще до появления соответствующей инфраструктуры. Предполагается, что сети нового поколения станут не просто очередным этапом развития технологий беспроводной связи, а прорывной технологией, способной изменить окружающий мир – повседневную жизнь, сферы производства, развлечений, услуг и т. д. Кроме того, 5G-сети будут способствовать ускоренному развитию Интернета вещей, краевых вычислений и ряда других смежных технологий. Синергетический эффект взаимодействия этих технологий едва ли кто-то возьмется предсказать.

Уровень готовности к развертыванию 5G-сетей в различных отраслях и сферах деятельности различается: наименьший – в здравоохранении и обрабатывающей промышленности, наибольший – в секторе телекоммуникационного оборудования. Оперативное и успешное развертывание 5G-сетей зависит от наличия необходимых стандартов и спецификаций. Для сетей с рабочей частотой до 6 ГГц подходит инфраструктура 4G-сетей. Для 5G-сетей миллиметрового диапазона (более 6 ГГц) инфраструктуру придется создавать с нуля, но именно эти сети способны реализовать весь потенциал 5G-технологий. Важную роль в развитии 5G-сетей будут играть схемы памяти, как уже имеющиеся, так и перспективные. В качестве средства ускорения разработки 5G-аппаратуры можно рассматривать технологию программно управляемой радиосвязи (SDR). И, наконец, частные 5G-сети станут одним из факторов развития промышленного Интернета вещей.

## ГОТОВНОСТЬ К РАЗВЕРТЫВАНИЮ 5G-СЕТЕЙ И ОЖИДАЕМЫЙ ЭФФЕКТ

Начинается решающий этап развития технологии 5G. Важность быстродействующих и совместимых сетевых подключений никогда не была столь высока. Предприятия и потребители всегда должны быть на связи, где бы они ни находились. Типичные мобильные операции, требующие буферизации в современных мобильных сетях на базе 4G, в сетях 5G будут происходить мгновенно. Но быстродействие – не единственное преимущество технологии 5G, которая обеспечит существенный рост емкости, повышение надежности беспроводных соединений, а также сверхнизкое время ожидания, необходимые для предоставления критически важных услуг и масштабного распространения Интернета вещей [1].

Прогнозируется, что в 2019 году в мире будет продано до 37 млн мобильных телефонов, поддерживающих технологию 5G, а в 2023 году этот показатель составит 525 млн шт. Около 78% экспертов, представляющих шесть различных отраслей, заявили, что технология 5G окажет значительное влияние на их отрасли в течение следующих двенадцати месяцев. Степень готовности данных сегментов к освоению технологии 5G по пятибалльной шкале приведена в табл. 1 [2].

Итак, ожидается, что в 2020 году начнется массовое развертывание 5G-сетей. На проходившей в 2018 году в Пхенчхане Зимней Олимпиаде южнокорейские операторы связи уже эксплуатировали демонстрационную 5G-сеть, охватывавшую олимпийские объекты, Сеул и ряд других крупных городов страны. Однако на деле это была сеть, которую можно определить как 4G+ или 4G++. Теперь ведутся полномасштабные работы по развертыванию сетей нового поколения, наиболее активно в Южной Корее и США, где к 2024 году число базовых станций 5G достигнет 600 тыс. Коммерческие услуги

**Таблица 1.** Готовность к развертыванию 5G-технологии в вертикально интегрированных отраслях по состоянию на начало 2019 года. *Источник: IHS Markit*

Отрасль	Готовность по пятибалльной шкале
Телекоммуникации	5,0
Обрабатывающая промышленность	2,9
Здравоохранение	2,7
Энергетика	3,1
Потребительский сектор	4,3
Автомобильная промышленность, транспорт и логистика	3,7

<sup>1</sup> ЦНИИ «Электроника», главный специалист, mmackushin@gmail.com.

<sup>2</sup> АО «ЦНИИ «Электроника», генеральный директор.



**Рис. 1.** 5G: улучшение сервисов и новые варианты использования. Источник: IHS Markit

стационарных (с фиксированными узлами) беспроводных сетей уже доступны в нескольких городах США, Южной Кореи и ряде других стран. Оборудование, размещаемое на территории пользователя, предоставляется

крупнейшими поставщиками комплектного оборудования (ОЕМ). Попытки создания аналогов предпринимаются изготовителями по оригинальным проектам (а не по лицензиям – ODM), но их изделия пока уступают в производительности.

Развертывание 5G-сетей обусловлено взрывообразным ростом мирового трафика мобильных сетей – его годовой объем, составляющий 30 экзбайт (Эбайт, 1 Эбайт=10<sup>18</sup> байт), в ближайшее время будет увеличиваться на 50% ежегодно [1].

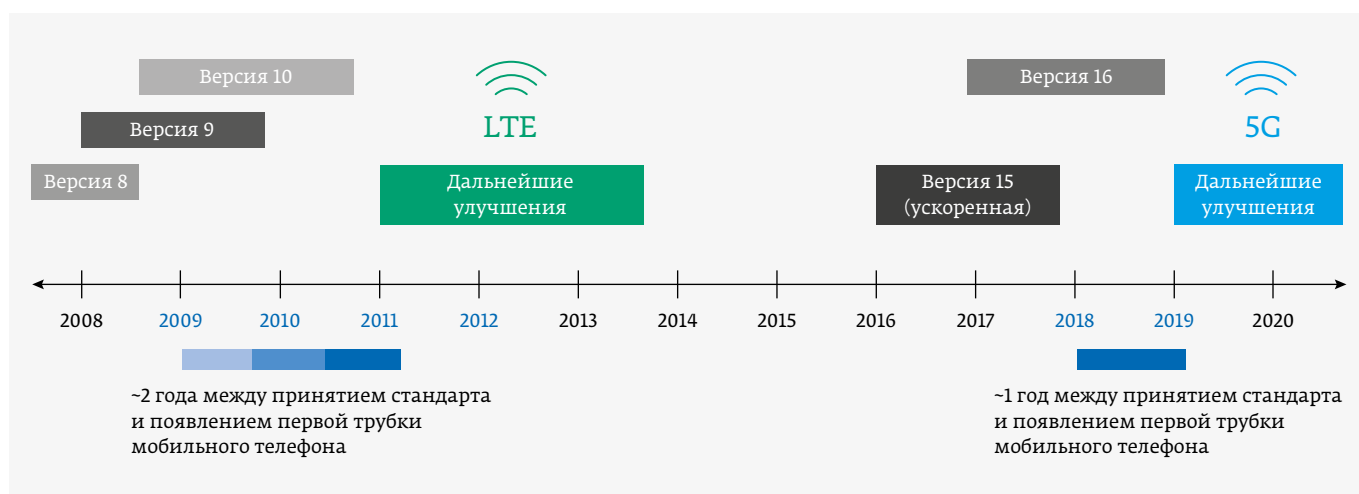
Повышенная емкость, предлагаемая технологией 5G, позволит сетям поддерживать большее число устройств и выполнять задачи с большим объемом данных. Технология 5G будет стимулировать рост ежедневной онлайн-активности. Несомненно, технология 5G поможет улучшить существующие сервисы и создать новые (рис. 1) [2].

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СТАНДАРТЫ

Началом коммерческого развертывания технологии 5G исследовательская корпорация IHS Markit (Лондон, Великобритания) считает создание сетей и средств связи, соответствующих Версии 15 спецификаций 3GPP\*, относящихся к реализации первого этапа технологий «Нового радио» (New Radio, NR).

Ключевые характеристики Версии 15 предусматривают (но не ограничиваются этим):

- неавтономный режим работы (например, с использованием ядра LTE и LTE в качестве опорной несущей);
- ширину полосы частот компонентных несущих до 100 МГц в спектре ниже 6 ГГц, полосы частот



**Рис. 2.** Переход от LTE к 5G. Источник: IHS Markit

\* **3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project)** – консорциум, разрабатывающий спецификации для мобильной телефонии третьего поколения. Создан в 1998 году. Основное направление деятельности – разработка технических спецификаций и отчетов в области сетевых технологий и радиодоступа в мобильных системах. Разработал стандарты GSM, GPRS, EDGE, WCDMA, HSPA и LTE-Advanced, 5G.

компонентных несущих до 400 МГц в спектре выше 6 ГГц;

- поддержку объединения операторов;
- поддержку цифрового и аналогового формирования луча;
- переменный интервал поднесущих.

Как и в случае развертывания предыдущих поколений мобильной связи, IHS Markit прогнозирует, что 5G будет совершенствоваться путем реализации соответствия требованиям Версии 2 NR второго этапа, а также последующих версий стандарта (рис. 2) [2].

### КРИТИЧНОСТЬ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ 5G

Следует отметить, что технология 5G отличается «двухэтажной» структурой. Сначала будут развиваться сети, работающие в диапазоне частот до 5–6 ГГц. Возможность использования ими инфраструктуры сетей поколения 4G облегчит переход на новый стандарт с технологической точки зрения и позволит значительно сократить издержки. Но этот «этаж» – промежуточный, переходный этап к сетям 5G миллиметрового диапазона (mmWave). Эта еще до конца не отработанная технология не преодолела «болезни роста».

Корпорация Mobile Experts (Кампбелл, шт. Калифорния) совместно с несколькими операторами мобильной связи из разных стран отслеживает спрос на трафик мобильных данных. При помощи инструмента Traffic Density контролируется уровень трафика в различных секторах. Применение показателя «Гбит/с – на – км<sup>2</sup> – на МГц спектра» (GkM) дает возможность понять, какими способами новейшие сети должны удовлетворять экстремальный спрос в некоторых городах. Сравнение GkM у различных операторов связи позволяет оценить, что потребуются при развертывании для обеспечения необходимого объема трафика – малые соты<sup>\*</sup>,

\* **Small cell** – малая ячейка (малая сота), узел радиодоступа с малой потребляемой мощностью, работающий в лицензируемом и нелицензируемом спектрах, диапазон действия от 10 м до 1–2 км (по сравнению с несколькими десятками у макросот). Малые ячейки – важный элемент разгрузки данных сетей третьего поколения (3G) и более эффективное (чем макросоты) средство управления спектром LTE Advanced. К малым сотам относятся фемтосоты, пикосоты и микросоты.

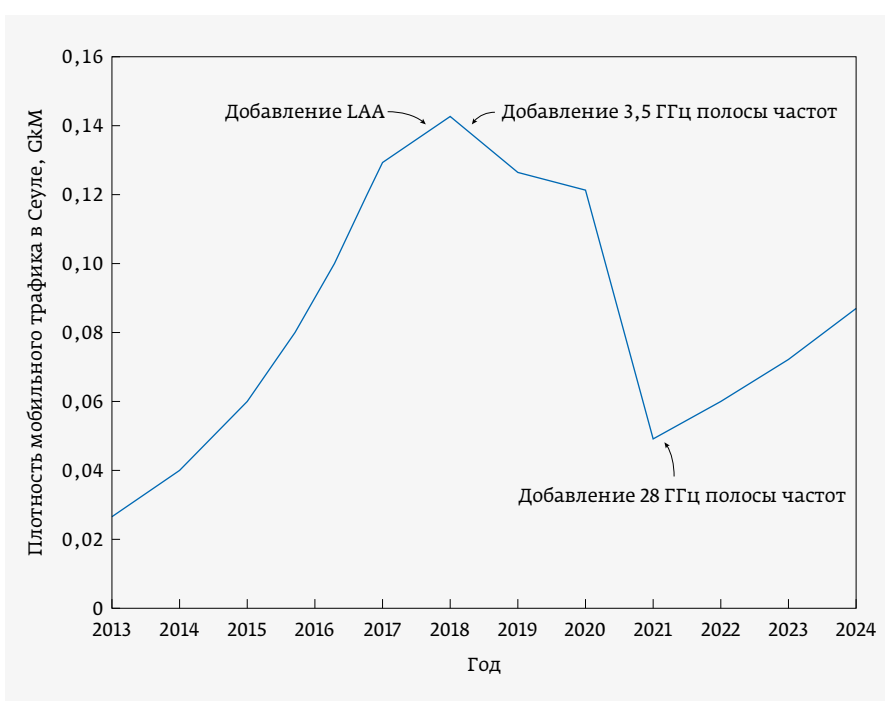


Рис. 3. Изменение плотности мобильного трафика по мере введения 5G-спектра. Источник: Mobile Experts

массовые MIMO<sup>\*\*</sup>-системы или миллиметровые базовые станции.

Плотность трафика, измеряемая в GkM, неуклонно растет на протяжении многих лет, что наиболее выражено на станциях метро в Сеуле и Токио, где стоящие вплотную друг к другу люди смотрят видеоконтент. На редкость плавное повышение плотности обусловлено появлением новых приложений и контента на мобильных платформах.

Когда уровень плотности трафика превысил 0,02 GkM, появилась тенденция повсеместного принятия малых сот. Другими словами, насыщенность макросети достигалась на уровне выше 0,02 GkM, и малые соты стали одним из рентабельных решений наращивания емкости сети.

В последнее время уровень плотности сетей превысил 0,1 GkM, поэтому для дальнейшего увеличения емкости необходимо использовать массовые MIMO-системы. В настоящее время появляются некоторые признаки того, что в диапазоне плотностей от 0,15 до 0,2 GkM возможно насыщение сетей

\*\* **MIMO (Multiple Input Multiple Output)** – метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий расширить полосу пропускания канала, в котором передача и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн. Передающие и приемные антенны разносят так, чтобы корреляция между соседними антеннами была слабой.



## WaveRunner 9000R

Осциллографы  
с полосой пропускания 500 МГц – 4 ГГц

**НЕВЕРОЯТНО МОЩНЫЙ,  
УДИВИТЕЛЬНО ПРОСТОЙ!**

- Максимальная частота дискретизации 40 ГГц
- Максимальный объем памяти 128 МБ
- Сенсорный дисплей 39,1 см
- Синхронизация и декодирование протоколов последовательной передачи данных более 40

**ООО «ЛеКрой Рус»**

г. Москва, 119071, 2-й Донской пр., д. 10, стр. 4  
тел./факс: +7 (495) 777 5592; info@LeCroy-Rus.ru  
[www.LeCroy-Rus.ru](http://www.LeCroy-Rus.ru)



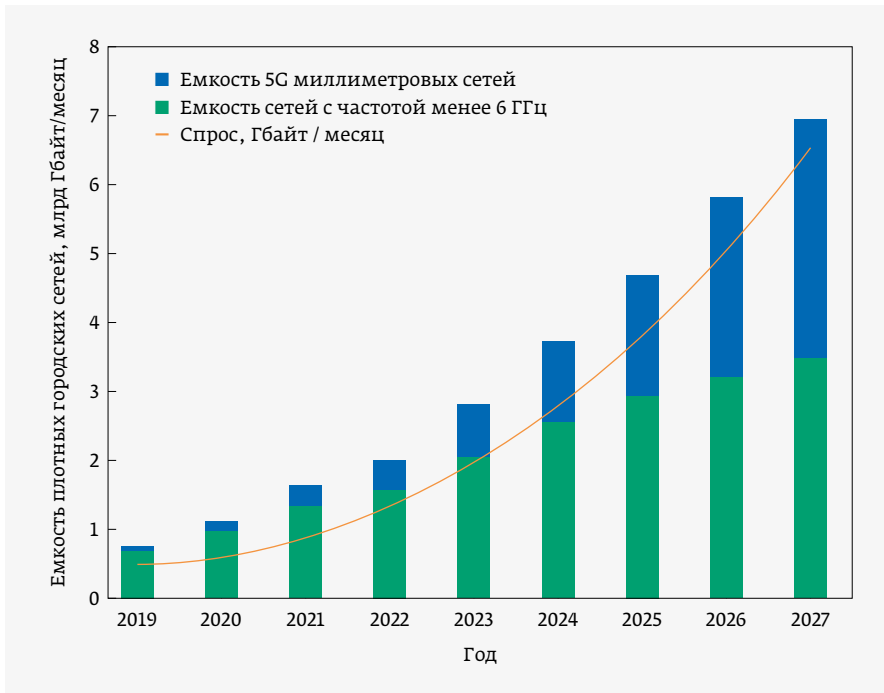


Рис. 4. Спрос и емкость плотности городских мобильных сетей в США.

Источник: Mobile Experts

OFDM<sup>\*</sup>. Рассматриваются способы преодоления этого барьера и выход за пределы 0,2 GkM в диапазонах частот 1–3 ГГц, но они, как правило, дорогостоящие, требующие применения большого числа радиоузлов с малой потребляемой мощностью.

Применение в мобильных сетях спектра 5G может снизить плотность трафика. Так, например, одна из ведущих южнокорейских сетей внедрила 100-МГц каналы на частоте 3,5 ГГц, что должно уменьшить показатель GkM. Дополнительные 800 МГц спектра на частоте 28 ГГц позволяют снизить плотность трафика в точках доступа до значительно более управляемых уровней (рис. 3).

Таким образом, операторы могут рассматривать использование 5G-спектра как средство управления плотностью трафика. Когда из-за высокой плотности наращивание емкости становится слишком дорогим, оптимальное решение – расширение спектра.

### Диапазон миллиметровых волн как решение проблем

Как только возможности использования удобных лицензируемых частотных диапазонов менее 5 ГГц оказались

\* OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов, канал OFDM. Схема модуляции и тип физического канала для высокоскоростной передачи данных в диапазоне 5 ГГц. Предложена компанией Intersil.

почти исчерпанными, для операторов мобильной связи миллиметровый спектр стал шансом для значительного повышения пропускной способности. Яркий пример – США, где широкие блоки С-диапазона (4–8 ГГц) недоступны, поэтому операторы мобильной связи вложили значительные средства в освоение 28- и 39-ГГц миллиметровых полос частот.

Крупные мобильные сети США уже исчерпали емкость на частоте менее 6 ГГц в основных городских районах. Во время крупных мероприятий, таких как Суперкубок<sup>\*\*</sup> США, плотность трафика находилась в диапазоне от 0,12 GkM и выше. Корпорация Mobile Experts моделировала спрос на услуги передачи данных в четырех сегментах американских сетей (плотно застроенные городские районы, городские районы, пригородные и сельские районы) и оценила общую емкость сети мобильной связи,

включая макробазовые станции, малые соты, услуги гражданской широкополосной радиосвязи (Citizen Broadband Radio Service, CBRS), лицензированный вспомогательный доступ (Licensed Assisted Access, LAA) и влияние массовых MIMO-систем в области менее 6 ГГц. Даже при полностью используемой гетерогенной сети с максимальной емкостью спрос в густонаселенных городских районах превысит емкость в 2023 году (рис. 4). Следует учитывать, что данные, приведенные на рис. 3, характеризуют общий спрос и емкость во всех городских районах США, поэтому, несомненно, появятся экстремальные места с высокой плотностью трафика (Таймс-сквер в Нью-Йорке, например), где спрос превысит емкость уже к 2021–2022 годам. Экстраполируя тенденции в соответствии с эталонным тестом плотности трафика, можно предположить, что в густонаселенных городских районах Нью-Йорка ежедневный уровень пиковой плотности может достигнуть 0,1 GkM и выше к 2020 году.

### Чем могут быть полезны миллиметровые линии связи

Многие специалисты обоснованно сомневаются в перспективах использования миллиметровых волн в мобильной среде. Линия связи mmWave зависит от того, удастся ли сформировать узкие главные лепестки

\*\* Финальная игра за звание чемпиона Национальной футбольной лиги в американском футболе.





ГРУППА КОМПАНИЙ

ЭЛЕКТРОННОЕ СПЕЦИАЛЬНОЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АО НПП ЭСТО (Группа компаний ЭСТО) - объединение ведущих российских предприятий, специализирующихся на разработках, производстве, модернизации, продаже и сервисном обслуживании специального технологического оборудования.

### Направления деятельности группы «ЭСТО»

Разработка и производство технологического оборудования (лазерное, вакуумное, сборочное, нестандартное) и внедрение технологий

Организация поставок как отдельных единиц зарубежного технологического оборудования, так и комплексных законченных технологий «под ключ»

Комплексная и частичная модернизация российского и зарубежного технологического оборудования любой сложности

Сервисное обслуживание российского и зарубежного технологического оборудования

Проектирование и строительство производств микроэлектроники

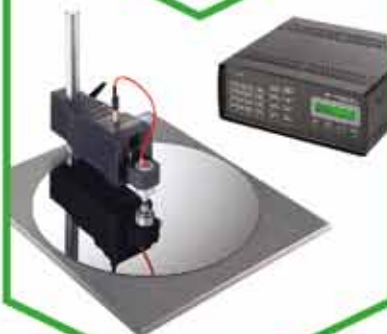
Обучение специалистов заказчика

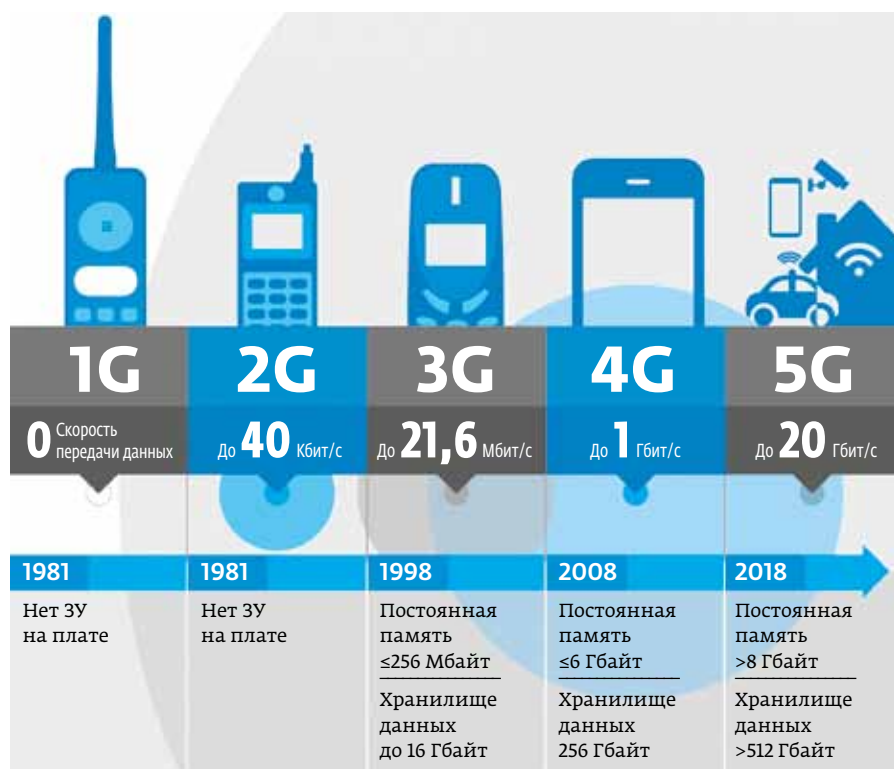
Технологический аудит производства

Группа компаний ЭСТО более 20 лет производит оборудование для микроэлектроники в собственном инженерно-производственном комплексе метражом в 5000 кв.м в г. Зеленограде

Акционерное общество  
«Научно-производственное  
предприятие «Электронное  
специальное технологическое  
оборудование»

124460, Москва, Зеленоград,  
просп. Георгиевский, д. 5, стр. 1  
тел.: (499) 729-77-51,  
(499) 479-12-39  
info@nppesto.ru  
www.nppesto.ru





**Рис. 5.** Тенденции развития сотовых сетей за последние 40 лет: рост быстрой скорости, повышенный спрос на емкость встраиваемых ЗУ, включая смартфоны и оборудование, хранящие перемещаемые данные.

Источник: Micron Technology

диаграммы направленности при приемлемых издержках. Любые помехи в РЧ-канале могут нарушить узкую направленность.

Недавно на испытательном комплексе в Сеуле была продемонстрирована эстафетная передача в мобильной 5G mmWave-сети, при этом оснащенное средствами 5G транспортное средство двигалось со скоростью 200 км/ч. То есть структура кадра передавалась эстафетой в экстремальных условиях доплеровского сдвига.

Однако операторы мобильной связи в начальной стадии не собираются использовать 5G-канал миллиметровой связи в качестве автономного (SA) радиоканала. Вместо этого LTE несущая в диапазоне частот 1–2 ГГц будет служить первичным трактом, а управляющие сигналы будут передаваться в более надежной низкой полосе частот. Когда для загрузки или выгрузки будет доступен большой объем данных, задействуется mmWave-канал связи. Таким образом, миллиметровый спектр позволит увеличить пропускную способность в качестве слоя объединения несущих, повышая скорость, когда это возможно, но не важно для непрерывности связи при эстафетной передаче. В какой-то момент операторы связи могут решить использовать 5G mmWave-технологии как SA мобильную сеть, но пока у них нет таких планов [1, 3].

## Промежуточный итог

Для 5G-сетей, работающих на частоте ниже 6 ГГц, характерен более широкий охват, но меньшая пропускная способность. По сравнению с сетями LTE производительность увеличится примерно на 25%. Кроме того, развертывание этих сетей менее капиталоемкое по сравнению с миллиметровыми 5G-сетями.

Миллиметровые (частота выше 6 ГГц) 5G-сети отличаются большим потенциалом, но меньшим покрытием. Тем не менее их внедрение – это реализация действительно преобразующей технологии. С каналами, пропускная способность которых начинается от 100 МГц, обширным пространством агрегации несущих, возможностью использования массового MIMO и улучшенного формирования луча технология миллиметровой 5G-связи будет сильно отличаться от того, что конечные пользователи получают в результате применения 5G на более низких частотах. Недостаток миллиметровой технологии – более высокая стоимость развертывания.

Реализация технологии 5G на частотах ниже 6 ГГц обеспечивает эволюционное развитие, причем в этом случае расширяются многие сценарии использования, которые начали применяться в рамках стандартов 4G-LTE и LTE-Advanced. Технология 5G на частотах выше 6 ГГц – это область, в которой воплощается революционный потенциал сетей пятого поколения [2, 3].

## СХЕМЫ ПАМЯТИ И МОБИЛЬНЫЕ СЕТИ

Современные мобильные сети значительно отличаются от предшественников, так как требуют больших объемов памяти, их вычислительные возможности выше. Мобильные сети передают видео 4K\*, голос, текстовые документы. К подключенным (к сетям) приборам теперь относятся не только смартфоны, но и датчики, парковочные счетчики, интеллектуальные автомобили, носимая электроника, приборы коммунальных служб (рис. 5).

Современная телекоммуникационная инфраструктура теперь и сетевая, и вычислительная одновременно – флеш-память и ДОЗУ вытесняют СОЗУ и троичную

\* 4K – обозначение разрешающей способности в цифровом кинематографе и компьютерной графике, примерно соответствующее 4000 пикселей по горизонтали.

ассоциативную/адресуемую память (ternary content-addressable memory, TCAM), что позволяет на той же площади разместить намного больший объем памяти.

Высокоскоростные TCAM способны просмотреть свое содержимое за один период тактовых импульсов, причем быстрее, чем СОЗУ. Они представляют собой основу сетевого оборудования (высокопроизводительных маршрутизаторов и переключателей), которая обеспечивает увеличение скорости поиска маршрута, классификации пакетов, пересылки пакетов и команд управления с доступом на основе списка. Несмотря на долговечность, TCAM – это в некотором роде экзотика: достаточно дорогостоящи, круг их поставщиков ограничен, однако для них характерен высокий уровень окупаемости. Применение данных приборов позволяет оптимизировать маршрутизаторы, ускоряя их работу с использованием меньшего объема аппаратного обеспечения.

Стандартные схемы TCAM на основе СОЗУ обычно реализуются в 16-КМОП транзисторной конфигурации, что ограничивает их емкость в стандартных структурах памяти несколькими десятками мегабайт. Возможный вариант замены – схемы ДОЗУ, так как относительная стоимость ИС данного типа емкостью гигабайтного уровня составляет 1/100 по сравнению с быстродействующими СОЗУ.

Другая альтернатива – резистивные ОЗУ (RRAM / ReRAM). В конце 2018 года специалисты Leti продемонстрировали схему TCAM на основе RRAM, которая по характеристикам примерно соответствует КМОП-схемам СОЗУ для многоядерных нейроморфных процессоров, правда, ее производительность и надежность пока оставляют желать лучшего. Одна из основных проблем ReRAM, а также считающихся перспективными схем

магниторезистивной памяти (MRAM) – температурные границы работы, не соответствующие требованиям операторов мобильной телефонной связи.

Несколько лет назад операторы телекоммуникационных сетей предъявляли к схемам памяти еще одно требование – безотказность работы в течение 30 лет. Сейчас требования мягче, операторов устраивает долговечность 5–10 лет. Частично это объясняется динамикой развития сетей – точнее, скоростью их развертывания. Так, если для сетей поколения 4G стандартное требование – срок службы схем памяти до 10 лет, то с переходом к поколению 5G сроки сокращаются. Специалисты отмечают также, что последнее поколение мобильных сетей – это просто технологическая платформа на основе имеющейся инфраструктуры широкополосной связи. Действительно, если в случае сетей 3G/4G основное внимание уделялось широкополосной связи (в том числе в рамках перехода с аналоговых на цифровые технологии), то поколение 5G рассматривается как целостная платформа, на основе которой можно реализовывать более широкие возможности. Кроме того, значительную роль играет фактор Интернета вещей.

Критически важный аспект для схем памяти при переходе к поколению 5G (рис. 6) мобильных сетей – время ожидания: чем меньше, тем лучше поддерживаются такие приложения, как онлайн-игры, дополненная и виртуальная реальность, автономные транспортные средства и т. п. Отдельную позицию в этом списке занимает дистанционная хирургия. Развитие подобных приложений иллюстрирует переход к более распределенной модели вычислений, что не может не затрагивать сферу схем памяти.



Рис. 6. Примерная структура 4G/5G-сетей. Источник: Objective Analysis



Поскольку вычислительные средства и возможности распределены от процессора в пользовательском приборе (смартфон, ноутбук, ПК и т. д.), возникают проблемы с точки зрения структур памяти – по всей цепочке прохождения возможных операций. Соответственно, значимость характеристик ЗУ, особенно на уровне аппаратной реализации, повышается. При этом все более важными становятся стандартные и нестандартные параметры температур, в условиях которых будут осуществляться вычислительные действия.

Для пересылки пакетов данных по-прежнему будут использоваться методики DDR и схемы памяти с высокой пропускной способностью. Следовательно, потребность во встраиваемой памяти по всей сетевой инфраструктуре будет увеличиваться. С этой точки зрения переход от 4G к 5G во многом будет связан с проблемами поддержки унаследованного<sup>\*</sup> оборудования. При этом сектор собственноручно нового аппаратного/программного обеспечения будет развиваться опережающими темпами.

Проблема состоит в том, что понятие линии связи размывается – эволюция от телекоммуникационной сети до технологической платформы означает, что речь идет не только о лучшей передаче голосовых сообщений и SMS/MMS-данных, но и о поддержке более широкого спектра сценариев (краевые вычисления<sup>\*\*</sup> и т. п.). При этом с течением времени объем использования в сетях искусственного интеллекта будет увеличиваться, что, в свою очередь, будет обострять проблемы с пропускной способностью и требуемыми объемами памяти.

Требования к схемам памяти, используемым в облачных/краевых вычислениях, в основном сводятся к низкой потребляемой мощности и высокому уровню обеспечения безопасности данных. В этом плане применение 3D-схем флеш-памяти NAND-типа проблематично – как по длительности хранения данных в «краевых» приложениях, так и по необходимости своевременной отправки данных в соответствующий центр обработки данных (ЦОД). Хотя 5G-технология – принципиально беспроводная, перед

ней будет стоять задача поддерживать широкий диапазон связи (мобильная связь, видеосвязь, связь типа межкомпьютерной передачи данных, а также связь «компьютер – ЦОД») по сравнению с ее предшественниками.

Характер платформы 5G означает, что в ее рамках возможно использование различных технологий памяти, а не только DDR3 и DDR4. Рассматриваются, например, варианты применения технологий LPDDR (DDR-память с низкой потребляемой мощностью) и GDDR (графическая DDR-память) [4].

## ТЕХНОЛОГИЯ SDR КАК СРЕДСТВО УСКОРЕНИЯ РАЗРАБОТКИ АППАРАТУРЫ 5G

Технология программно управляемой радиосвязи (SDR), первоначально разработанная для связи вооруженных сил США с более отсталыми в средствах связи союзниками по НАТО, оказалась перспективной в качестве инструмента сокращения цикла разработки 5G-систем и средств связи на основе коммерческих платформ (COTS – товары, приобретаемые в готовом виде на рынке).

Подход COTS SDR традиционно используется в радиолокационных и связанных применениях с целью увеличения производительности используемых систем и повышения гибкости конструкций. Последние продукты типа COTS SDR представляют собой комплексные решения с интегрированными устройствами ввода/вывода, процессорами ARM и крупными вентиляемыми матрицами, программируемыми пользователем (FPGA), предусматривающими возможность использования СФ-блоков (интеллектуальной собственности) различных поставщиков, обеспечивающими доступ к цифровым данным, операциям маршрутизации и обработки подобных данных. Предполагается, что благодаря подобным функциональным возможностям, совмещенным с обеспечением целостности сигнала, фазово-когерентным выборкам и применению многоканальных приемопередатчиков подход COTS SDR станет идеальным выбором для развития 5G-платформ.

## Аппаратное обеспечение

Технология SDR призвана заменить устаревающие аналоговые системы, состоящие из РЧ-фильтров, аналоговых понижающих преобразователей частоты (т. е. гетеродина и смесителя), полосовых фильтров и демодуляторов. Подобные аналоговые системы, как правило, функционально ограничены АМ- или ЧМ-радиоприменениями.

Применение методов цифровой обработки сигнала в технологии SDR позволяет реагировать на повышение сложности, требований к точности и увеличение ширины полосы частот современных радиосистем. При использовании технологии SDR требуется преобразование данных на участке от антенны и ЦОС обработки сигнала для реализации функций приема/передачи сигнала. SDR-приемник

\* **Legacy systems (legacy database, legacy software, legacy device)** – унаследованные системы (приложения, базы данных, ПО, устройства), системы, переставшие удовлетворять потребностям применений, но все еще эксплуатируемые из-за трудностей их замены, так как при проектировании таких систем не предусмотрена возможность их перестройки.

\*\* **Edge computing** – краевые вычисления, метод оптимизации облачных вычислительных систем путем дополнения обработки данных на границе сети вблизи источника данных. Данный подход позволяет снизить интенсивность информационного обмена между датчиками и центром обработки данных, данные генерируются в источнике или вблизи него. Требует использования ресурсов, не подключенных к сети постоянно (ноутбуков, смартфонов, планшетных ПК, датчиков и т. п.).

преобразует РЧ-сигнал, получаемый антенной, в цифровую форму при помощи АЦП и использует последующие операции цифровой обработки сигнала для извлечения необходимой информации. В свою очередь, SDR-передатчик воспринимает передаваемую цифровую информацию и выполняет необходимые для операций цифровой обработки сигнала действия, затем информация через усилитель мощности передается на антенну.

Поскольку данные радиосистемы – программно определяемые, их программирование и перепрограммирование можно осуществлять за очень короткие интервалы времени – буквально «на лету» (т. е. за несколько микросекунд), при этом новая прошивка может быть как внутренней, так и внешней.

### Микропрограммное обеспечение

FPGA состоит из несвязанных блоков логики, арифметических блоков и блоков обработки сигналов, которые прошиваются для реализации определенных функций. Хотя прошивка обеспечивает экстремальную гибкость программирования, собственно разработка прошивки очень сложна. Для упрощения процесса разработки некоторые производители COTS SDR предоставляют для обеспечения базовой работы своих плат СФ-блоки FPGA. Обычно такие блоки обеспечивают аналоговые и цифровые функции ввода-вывода для получения и передачи данных. При этом ЦОС СФ-блоки выполняют специфические радиофункции: цифровое понижающее преобразование (DCC), фильтрацию, канализацию и передачу данных в систему. DDC-функции требуют использования трех типов блоков: локальных генераторов с цифровым управлением, сложных смесителей и цифровых фильтров для замены некоторых функций устаревших аналоговых радиосистем.

### Программное обеспечение

Если предоставляемые поставщиком FPGA СФ-блоки соответствуют спецификациям конкретного приложения, для реализации системы в целом может потребоваться управляющее ПО, поддерживающее работу радио. Подобные СФ-блоки FPGA должны соответствовать определенным эксплуатационным параметрам, передающимся через системный интерфейс ПО, что является функцией пакета поддержки платы (board support package, BSP). BSP предусматривает библиотечные функции и предварительно скомпилированный пример кода, который может использоваться для тестирования функциональности платы. Одна из таких функций – управление АЦП для сбора и передачи данных в FPGA для дальнейшей DDC-обработки. Обработанные данные могут храниться в памяти или передаваться в ЦАП для преобразования обратно в аналоговый сигнал и его вывода на передачу. Это пример ПО, разработанного с использованием функций и драйверов библиотеки ПО BSP.

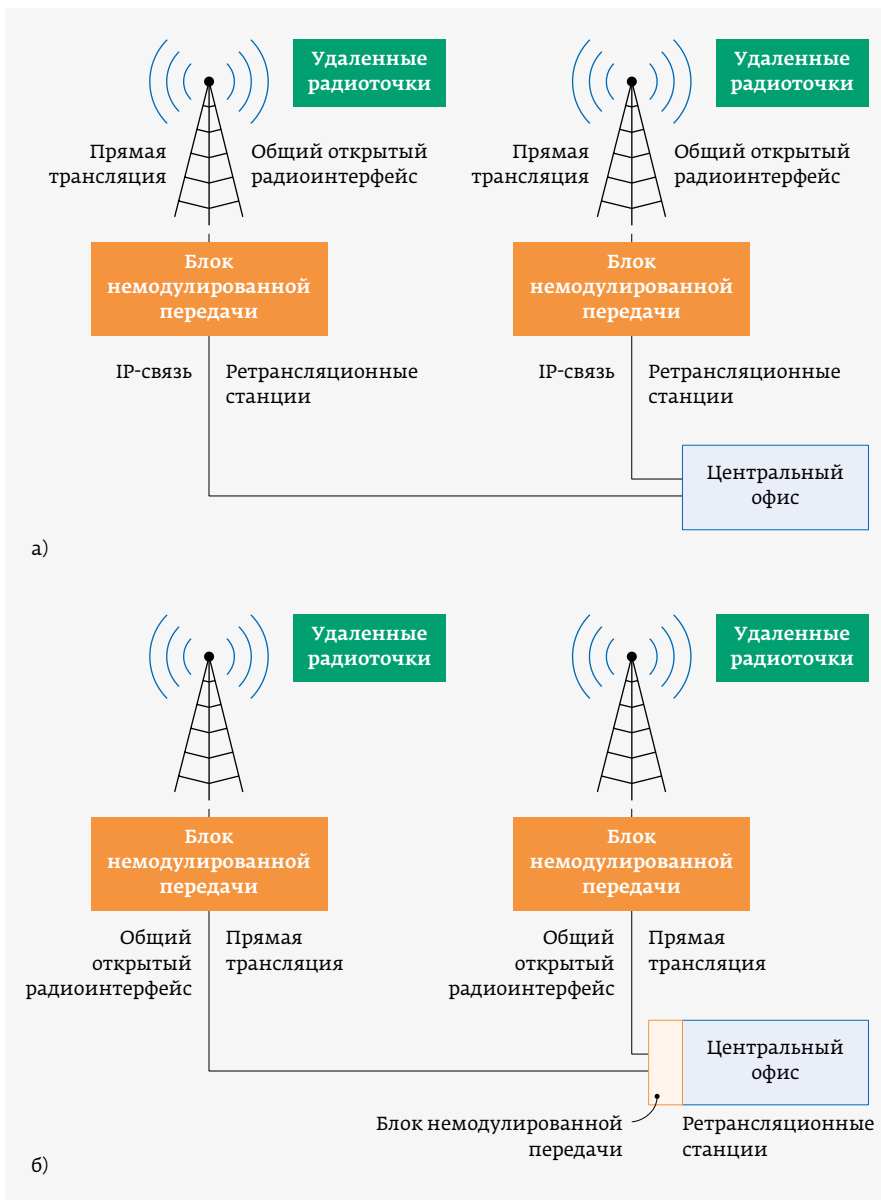
### Варианты применения 5G

Появление очередного поколения технологии SDR стимулирует изменение подходов, которые могут использоваться COTS-производителями для предоставления разработчикам 5G-радиопродуктов многоканальных SDR-приемопередатчиков. На рис. 7 проиллюстрирована разница между распределенными зональными сетями массового доступа (D-RAN) и централизованными зональными сетями радиодоступа (C-RAN). По мере развития технологии LTE традиционные D-RAN узлы сотовой связи заменялись более современными C-RAN узлами, что позволило повысить эффективность передачи данных и снизить расходы на обеспечение / осуществление радиосвязи. Однако архитектура Massive MIMO на основе миллиметровых волн, предназначенная для средств/сетей 5G, требует разделения, что позволит перемещать удаленные радиоточки (remote radio head, RRH) ближе к конечному пользователю, поскольку по мере удлинения пути прохождения радиосигнала увеличиваются потери.

В структурную схему C-RAN входят следующие модули: блок немодулированной передачи (baseband unit, BBU), модули RRH, блоки GPS времени / опорной частоты, а также модули межсоединений – сетевые модули, обеспечивающие одноканальное соединение между локальным и центральным концентраторами. Большая часть этих блоков может использовать COTS SDR. BBU, обычно размещаемая в центральном офисе или в виртуальной сети (в облаке), снабжена доступом к нескольким оптическим линиям передачи данных для ретрансляционных станций. RRH характеризуются внешним размещением – ближе к конечному пользователю. BBU и RRH в случае прямой трансляции могут использовать общий открытый радиоинтерфейс (common public radio interface, CPRI – стандарт, определяющий интерфейс между функциональными блоками базовой станции сотовой связи), стандарт Инициативы архитектуры открытой базовой станции (Open base station architecture initiative, OBSAI) или стандартные Ethernet-соединения – в зависимости от системных требований. Однако не исключено, что в перспективе эти интерфейсы будут заменены новыми концепциями обеспечения непосредственной радиотрансляции, такими как расширяемые сети радиодоступа (extensible radio access networks, xRAN) и открытые сети радиодоступа (open radio access networks, ORAN) [5].

### ЧАСТНЫЕ 5G-СЕТИ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Внедрение технологии 5G будет иметь далекоидущие последствия для промышленного Интернета вещей, но в ближайшей перспективе повлияет не на все его приложения. Так, например, технологии нового поколения предоставляют огромные преимущества в таких областях, как высококомпьютеризированное умное производство, но они не



**Рис. 7.** Распределенная (а) и централизованная (б) зональная (региональная) сети. *Источник: Pentek Inc.*

сразу станут решением для сравнительно простых приложений, требующих масштабного развертывания, например, интеллектуальных счетчиков и различных приложений для сельского хозяйства. Многие приложения будут по-прежнему полагаться на производные технологии LTE для глобальных сетей с низким энергопотреблением (LPWAN), такие как LTE Cat.M1 и NB-IoT, более приспособленные к приложениям промышленного Интернета вещей, чем LTE общего назначения. Во многих случаях актуальна оптимальная структура затрат, которую 5G не сможет достичь, по крайней мере, в ближайшие несколько лет.

Многие эксперты считают, что наибольшее влияние 5G на промышленный Интернет вещей может оказать

создание частных сетей на территории заводов. Частные сети 5G на фабриках могут позволить компаниям создавать безопасные выделенные сети в ограниченных географических зонах, адаптированных для конкретных промышленных приложений.

Некоторые заводы уже используют частные сети, построенные по технологии LTE. Но архитектура системы 5G была разработана с учетом возможности применения в частных сетях, что позволяет развертывать автономные частные сети. В отличие от LTE, 5G предлагает частным сетям несколько вариантов распределения спектра, включая получение лицензируемого спектра в определенной географической области у операторов мобильной связи, использование нелицензируемого спектра как с синхронным, так и асинхронным обменом, а в некоторых странах существует выделенный для промышленного Интернета вещей спектр (рис. 8).

Впервые у предприятий и умных городов появляется возможность развернуть собственную сеть, позволяющую внедрять различные инновации. Эксперты подчеркивают, что обеспечение безопасности спектра для частных сетей 5G будет связано с определенными издержками, но новая модель развертывания такой инфраструктуры будет существенно отличаться от текущей модели для частных сетей, требующей долгосрочных сделок с операторами связи.

Промышленные игроки, внедряющие частные 5G-сети для промышленного Интернета вещей, смогут планировать свою 5G-сеть на период до 10–15 лет, потому что знают, что за ними закреплен определенный спектр.

Таким образом, частные 5G-сети – это действительно новшество, обладающее потенциалом полного изменения динамики заводских сетей [6].

\*\*\*

Успешное и оперативное развертывание 5G-сетей определяется прежде всего экономическими факторами и оценивается с точки зрения рентабельности. Там, где 5G-технология сможет предложить, с учетом технических преимуществ, достаточно близкие к предшествующим сетям



# POWER ELECTRONICS



16-я Международная выставка  
компонентов и модулей  
силовой электроники

**22-24 октября 2019**

Москва, Крокус Экспо

## Силовая Электроника

UFI  
Approved  
Event

Единственная в России  
специализированная  
выставка компонентов  
и модулей силовой электроники  
для различных отраслей  
промышленности

Организатор — компания MVK  
Офис в Санкт-Петербурге

**MVK**

Международная  
Выставочная  
Компания

+7 (812) 380 6009/00  
power@mvk.ru

Подробнее о выставке:

**powerelectronics.ru**

12+





Рис. 8. Диапазон использования частных 5G NR сетей. Источник: Qualcomm

экономические параметры, проблем не возникнет. Выбор не в их пользу, несмотря на технологическое превосходство, будет там, где 5G-подходы обойдутся существенно дороже или окажутся избыточными. В таких случаях придется ждать сближения экономических параметров существующих и перспективных сетей, формирования потребностей в новых услугах, которые нивелируют фактор избыточности.

Важным условием развертывания 5G-сетей станет их взаимодействие со смежными технологиями. Например, для успешного внедрения 5G-сетей технология краевых (пограничных) вычислений становится не менее важной, чем технология связи с использованием волн миллиметрового диапазона. Можно предположить, что 5G и краевые вычисления не добьются успеха поодиночке. Так, сети 5G не могут соответствовать требованию консорциума 3GPP о времени ожидания не более 4 мс без некоторого слоя доставки данных, запуска приложений и работы с многоуровневыми приложениями в рамках непредсказуемого массива интеллектуальных устройств. В свою очередь, краевые вычисления, первоначально разработанные менеджерами Интернета вещей как средство сохранения контроля за своими данными, не будут функционировать должным образом без сверхбыстрой беспроводной связи [7].

Развертывание 5G-сетей, особенно миллиметрового диапазона, будет связано с необходимостью крупных инвестиций в развитие инфраструктуры, разработку нового оборудования и выполнение НИОКР. Соответственно, в данном и смежных секторах вполне возможна активизация процессов слияний/поглощений, формирования альянсов и консорциумов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Madden J.** mmWave Will Be The Critical 5G Link // Microwave Journal. May 2. 2019. <https://www.microwavejournal.com/articles/32189-mmwave-will-be-the-critical-5g-link>.
2. The promise and potential of 5G: Evolution or revolution? // IHS Markit. 2019. 332810172-JH-0319. [https://cdn.ihs.com/www/pdf/0419/IHS-Markit-Technology-5G-The-Promise-Potential.pdf?utm\\_campaign=PC11531-1\\_eT1\\_JM\\_Global\\_5G\\_Status&utm\\_medium=email&utm\\_source=Eloqua&elqTrackId=a536e62cbdf745ddae54d98835717844&elq=680f8bc57e8342939a2c8dcab249b227&elqaid=81579&elqat=1&elqCampaignId=34511](https://cdn.ihs.com/www/pdf/0419/IHS-Markit-Technology-5G-The-Promise-Potential.pdf?utm_campaign=PC11531-1_eT1_JM_Global_5G_Status&utm_medium=email&utm_source=Eloqua&elqTrackId=a536e62cbdf745ddae54d98835717844&elq=680f8bc57e8342939a2c8dcab249b227&elqaid=81579&elqat=1&elqCampaignId=34511)
3. **Chen H., Gentile R.** Spatial Multiplexing for 5G Wireless Communications // Micro-wave Journal. August 14. 2018. <http://www.microwavejournal.com/articles/30837-spatial-multiplexing-for-5g-wireless-communications>.
4. **Hilson G.** 5G Needs More Memory to Compute // EE Times. 04.02.19 [https://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1334512#](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1334512#)
5. **Muro B.** Using a COTS SDR as a 5G Development Platform // Microwave Journal. February 13. 2019. <http://www.microwavejournal.com/articles/31756-using-a-cots-sdr-as-a-5g-development-platform>.
6. **McGrath D.** Private 5G Networks Expected to Boost Industrial IoT // EE Times. 06.28.19 [https://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1334872](https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1334872).
7. **Fogarty K., Sperling E.** Edge Complexity To Grow For 5G // Semiconductor Engineering. July 2<sup>nd</sup>. 2019. <https://semiengineering.com/edge-complexity-to-grow-for-5g>.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ



ГЕНЕРАЦИЯ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ



КОНТРОЛЬ  
ФОТОШАБЛОНОВ



РЕМОНТ  
ФОТОШАБЛОНОВ



ФОТОЛИТОГРАФИЯ



КОНТРОЛЬ  
ПЛАСТИН

### БЕЗМАСОЧНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Многоканальные лазерные генераторы изображений
- Проектная норма 0.35, 0.6  $\mu\text{m}$
- Высокая точность совмещения
- $\varnothing 200, 150, 100$  мм



### ГЕНЕРАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Диапазон UV, DUV
- Проектная норма 90, 130 нм
- 16/32-лучевая архитектура
- Фазосдвигающие шаблоны
- Быстрая переналадка пластина – шаблон



### КОНТРОЛЬ ФОТОШАБЛОНОВ

- Проектная норма 90, 130, 250 нм
- Твердотельный лазер
- Контроль методом Die-to-DB, Die-to-Die
- Высокая производительность
- Контроль неплоскостности



### РЕМОНТ ФОТОШАБЛОНОВ

- Фемтосекундный лазер
- 0.15/ 0.3/ 0.5  $\mu\text{m}$  min элемент
- Размер шаблона до 9" x 9"
- Ремонт копированием
- Ремонт через пелликл
- Прозрачные / непрозрачные дефекты



### КОНТАКТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Ручная и автоматизированная загрузка
- Двусторонняя литография
- Высокая точность совмещения
- Низкий уровень генерации дефектов
- Высокая энергоэффективность



### СТЕППЕРЫ

- Проектная норма 0.35, 0.8  $\mu\text{m}$
- Автоматический масштаб
- Двустороннее совмещение
- $\varnothing 100, 150, 200$  мм
- Твердотельный источник света



### КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ

- Контроль привносимых дефектов пластин без топологии
- Автоматический микро и макро контроль дефектов пластин с топологией
- Высокая производительность



### АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ

- Контроль микроразмеров
- Контроль неплоскостности
- Контроль координат
- Контроль толщин
- Контроль рассовмещения



- Единое таможенное пространство
- 58 лет опыта в разработке и производстве прецизионного оптико-механического оборудования
- Высокий уровень применяемых технологий и современного оборудования
- Полный цикл разработки и производства
- Высококвалифицированный персонал
- Высокое качество изделий подтверждено национальными и международными стандартами
- Возможность комплексной поставки оборудования, адаптированного для Российского рынка, программного обеспечения для поддержки процессов изготовления фотошаблонов и 3D-моделирования для фотолитографии компании GenISys (Германия) 